

旋/直复合流化下循环流化床 脱硫塔内的气液分布特性研究

崔琳, 马春元, 董勇, 宋占龙

(山东大学能源与动力工程学院环境热工过程教育部工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要 应用激光相位多普勒颗粒分析仪(PDA)和双回路抽气式热电偶测试了旋/直复合流化方式下烟气循环流化床脱硫塔内的液滴和气相温度的分布规律。结果表明,在整个干燥过程中液滴的分布基本呈中心区域高边壁区域低的趋势;与常规直流流化方式相比,当相对高度 $H/D > 2$ 时,旋流的存在从整体上提高了塔内各点的液滴干燥速度,而且旋流量越大,干燥速度越快;在喷嘴雾化区域内,烟气温度分布呈中间低边壁高的趋势,当相对高度 $H/D < 2$ 时,旋流的存在加剧了这种趋势,但有无旋流对液滴完全干燥后的气相温度及分布影响不大;综合来看,旋/直复合流化方式能够有效减轻粘壁现象。

关 键 词 循环流化床; 旋/直复合流化; 气相温度分布; 液滴分布

中图分类号: X701.3 文献标识码: A

引 言

半干法烟气脱硫装置中,采用文丘里管流化的循环流化床是常用的一种,该装置的特点之一是中心只有一股用文丘里管流化的直流射流。通常,为了保证脱硫效率,要求塔内有较大的颗粒浓度,这需要文丘里管较大的流化速度来维持,而流化速度正比于烟气总流量。因此,当机组负荷较低时,直流流化速度变小,造成大量颗粒沉降而退出循环,难以维持较大的颗粒浓度,影响脱硫装置的正常运行。针对这种情况,山东大学在循环流化床脱硫技术的文丘里管直流流化基础上提出了旋/直复合流化方式,并设计了不同类型的旋/直复合流化结构件来加以实现。研究发现,与传统的单管文丘里直流流化方式相比,旋/直复合流化方式能够提高塔内颗粒浓度,增强内循环,提高负荷适应性,同时能够提高气固切向速度,强化扰动,从而有利于气液固三相混合与传热传质的快速进行^[1~3]。目前,该流化方式已在工程上取得了不错的实用效果。

然而,由于目前的研究主要集中于冷态气固两相流场方面^[4~7],对于热态条件下气液场的研究尤其是旋流的存在对液滴及气相温度分布的影响研究非常少,而这两者的分布变化直接涉及到塔内液滴的干燥过程、粘壁问题及气液固三者反应的组织等问题。因此,在已有研究基础上,本文采用激光相位多普勒颗粒分析仪(PDA)及双回路抽气式热电偶,对旋/直复合流化下循环流化床脱硫塔内的液滴及温度分布进行测试,得到流化床内液滴及气相温度的分布规律,并与直流流化方式进行比较,为中试及工业应用提供依据。

1 试验系统及测试方法

1.1 试验系统

试验系统如图 1 所示,系统采用电加热空气的方式提供热模拟烟气,通过温控系统控制入塔热烟气的温度。脱硫塔主体高 H 为 2.8 m,直径 D 为 300 mm,主体前后壁面均装有条形玻璃窗口,便于 PDA 的测量;脱硫塔喉口采用套筒设计,经过喉口的烟气分为两路,中心为直流,套筒和脱硫塔内壁面之间的烟气沿夹层通道上升,经过渐扩段之后在导流板的作用下切向进入,形成切向旋流,达到旋/直复合流化的目的。

切向导流板是保证形成稳定旋流的关键,结构如图 2 所示。在夹层和切向入口尺寸一定时,切向入口的数量决定旋流段的阻力和旋流的流量,可以通过改变切向入口数量来调节旋流流量,实验中切向入口有 6 个,并可根据需要关闭全部或部分入口,因此旋流段兼具流量调节的作用,当机组负荷变化,入塔流量降低时,可关闭部分旋流入口以保证直流流化速度。

增湿降温喷嘴安装在距旋流入口上方 $0.5D$ 的位置,旋流入口在渐扩段上端 $0.7D$ 处;喷嘴采用美国

收稿日期: 2008-10-27; 修订日期: 2009-01-24

基金项目:“十一·五”国家科技支撑计划重点基金资助项目(2006BAA01B04);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(2006BS08024)

作者简介: 崔琳(1978-)男,山东寿光人,山东大学博士研究生

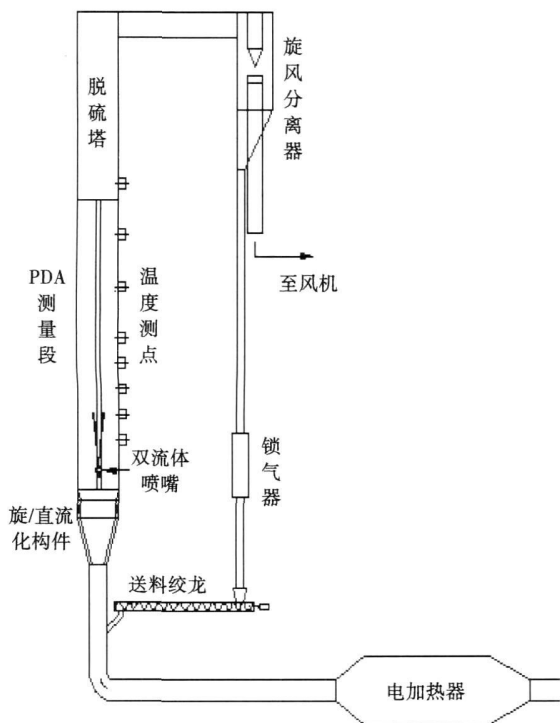


图1 试验系统

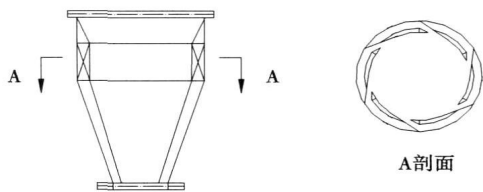


图2 导流板结构

喷雾公司生产的 JAC-SU22B 型双流体雾化喷嘴, 喷水量通过烟气的热平衡计算来确定, 并通过控制水路和气路的压力来调节; 水路设有累积流量计进行总量的控制。喷嘴的液滴粒径分布如图 3 所示。

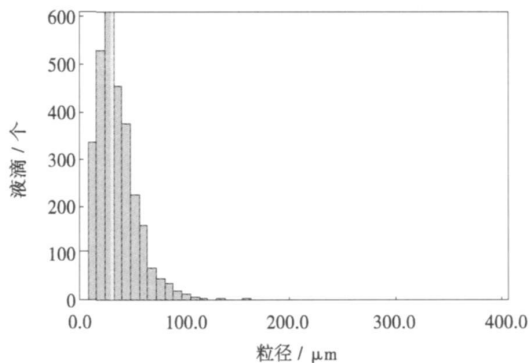


图3 喷嘴雾化粒径

1.2 测试系统

试验中液滴场采用 PDA 进行无接触测量, 每个测试点采样数据 3 000 个, 限时 120 s; 为保证数据分析的可靠性, 对于数据率较低的测点, 采样时间适当延长。

气相温度场采用双回路抽气式热电偶进行测量^[8], 该热电偶采用套管设计, 在测温点设置 2 个抽气入口, 分别与内外套管连接, 外层管中烟气起保温作用。内层烟气管内靠近入口处布置有热电偶测量温度。测温时热电偶进气口顺主气流方向放置, 由于液滴的惯性大, 在抽气量较小时仅烟气进入管内, 液滴不进入, 这样就实现了烟气和液滴混合流场中气相温度的测量; 试验中抽气量为 4.5 m³/h, 占烟气总量 1.1%, 其影响可不考虑。

表1 试验条件

	入口烟温 <i>T</i> / °C	烟气量 / m ³ ·h ⁻¹	喷水量 / L·h ⁻¹	塔内平均速度 / m·s ⁻¹	截面测点分布 相对半径 <i>r</i> / <i>R</i>	轴向测点分布 相对高度 <i>H</i> / <i>D</i>
温度测量	155	400	9	1.44	0, 0.27, 0.53, 0.8	1.5, 2.2, 5.3, 3.5, 4, 5, 6
液滴测量					0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.93	1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4

1.3 试验条件及数据处理方式

试验条件如表 1 所示。考虑液滴及温度场基本呈对称性分布, 不同高度截面上液滴及气相温度的测量只在半径方向上进行; 在对 PDA 所测数据进行分析时, 取粒径大于 10 μm 的液滴的分布表示液滴场。由于液滴在运动中不断蒸发, 其颗粒数目不断减少, 在颗粒数较少时难以测出浓度数据, 因此采用更易获得的“液滴有效数据率”表示液滴的分布。“液滴有效数据率”是指 PDA 每秒采集到的有效粒子数量; 在塔内工况相对速度变化不大的情况下, 其

变化趋势与粒子浓度的变化趋势一致。

测点位置采用相对比值表示, 相对半径“*r* / *R*”表示截面测点距截面中心点距离与塔半径的比值, 相对高度“*H* / *D*”表示轴向测点距旋流入口的距离与塔直径比值。

试验中旋/直复合流化设定 3 种工况: 无旋流、间隔开 3 个旋流口(图中表述为“3 旋流口”)、开 6 个旋流口(图中表述为“6 旋流口”); 由于夹层内流动不满足流量测量的要求, 因此通过数值模拟来确定旋流结构的流量分配情况。从图 4 可以看出, 开 3

个旋流入口和开6个旋流入口的工况下,旋流流量占总风量的比值分别在16%~18%和23%~25%之间,随着表观风速的升高,旋流流量比稍微降低,在测量的流化速度范围内,变化不大。

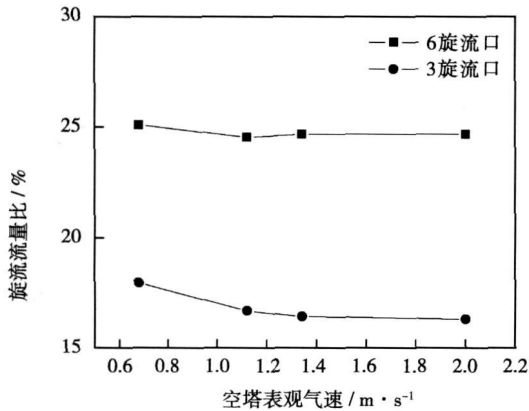


图4 旋流结构流量分配

脱硫塔塔内烟气速度分布比较均匀,不存在偏流现象,冷态无旋流时空塔塔内各点气速与表观气速之比如图5所示。

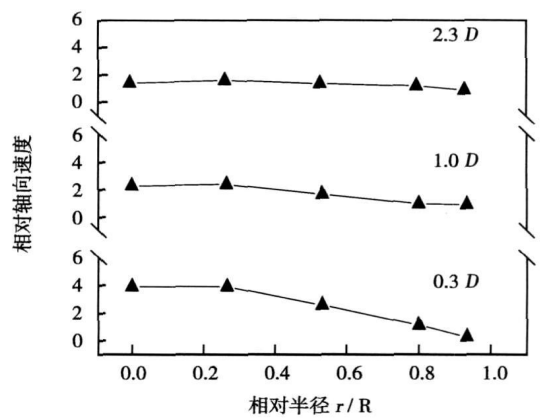


图5 无旋流时空塔塔内气速分布

2 试验结果及分析

2.1 液滴的分布规律

在喷嘴操作参数不变的情况下,液滴分布变化直接体现了旋/直复合流化对塔内干燥特性的影响。图6为入口温度155℃、塔内平均流速1.44 m/s、喷水量9 L/h时,不同工况下以有效数据率表示的液滴在典型截面的分布情况。

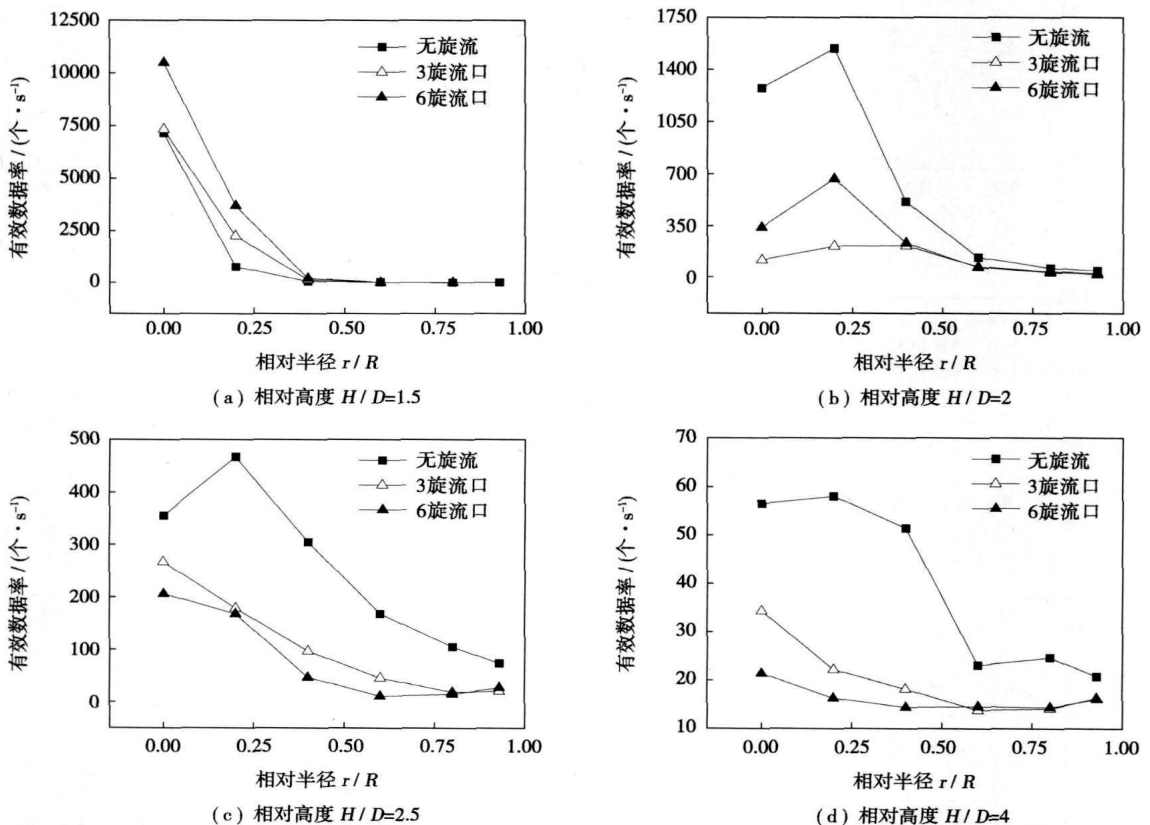
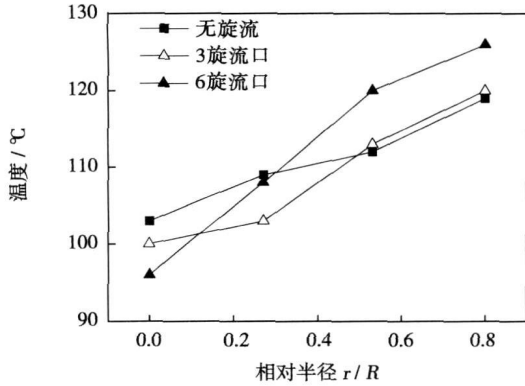


图6 不同相对高度下液滴的径向分布规律

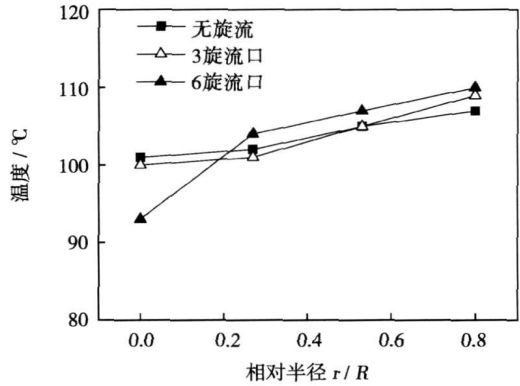
由图可知, 整个干燥过程中液滴在脱硫塔内的分布基本呈中心高边壁低的趋势; 有旋流的情况下, 当相对高度 $H/D > 2$ 时, 液滴在径向各点上的数量明显小于无旋流情况, 而且旋流量越大, 差别越明显; 边壁附近轴向上在整个液滴干燥的过程中, 有旋流情况下的液滴数量也一直小于无旋流情况, 但随

旋流量增大, 液滴数量减小的幅度不大。

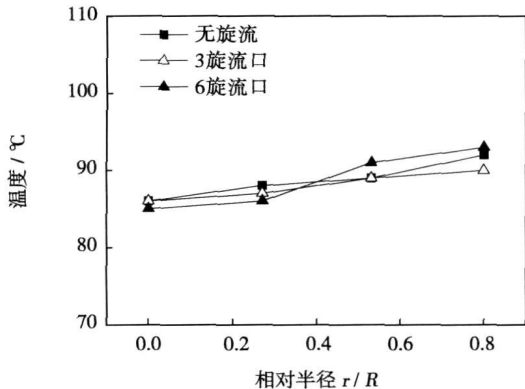
分析认为, 受喷嘴喷雾特性的影响, 液滴的蒸发干燥过程同时也是一个沿轴向不断向径向方向扩散的过程, 在扩散过程中液滴不断与烟气换热蒸发, 数量不断减少, 因此, 液滴的分布基本呈中心高边壁低的趋势。



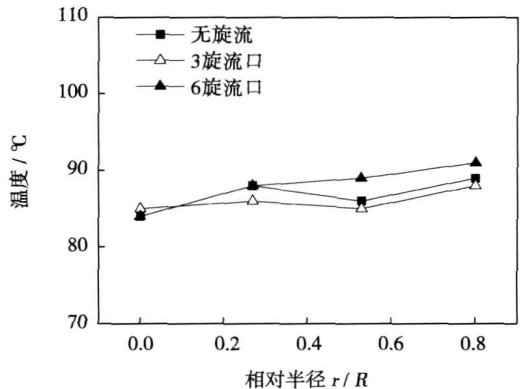
(a) 相对高度 $H/D=1.5$



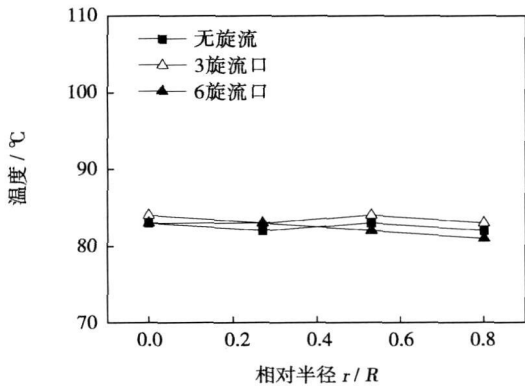
(b) 相对高度 $H/D=2$



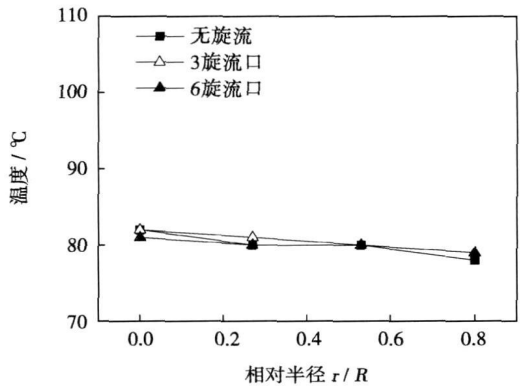
(c) 相对高度 $H/D=3.5$



(d) 相对高度 $H/D=4$



(e) 相对高度 $H/D=5$



(f) 相对高度 $H/D=6$

图 7 不同相对高度下塔内截面气相温度的分布规律

随着旋流的加入, 在脱硫塔内尤其是中下部形成了中心以直流为主、边壁以旋流为主、旋/直相互融合的区域。壁面附近旋流区域的形成, 使得

壁面附近扰动增强、切向速度及相对滑移速度增加, 同时热烟气量增加, 近壁处热容量增大, 对边壁附近的液滴而言, 一方面, 热量的增加能够维持较高的温

度梯度,有利于液滴的干燥;另一方面,旋切流动的增强能够强化传热传质,也有利于液滴的快速干燥。因此,有旋流时边壁处液滴的数量一直小于无旋流的情况。而且随着旋流流量的增加,边壁附近的热容量越多、旋切流化也越强,液滴越容易被干燥,发生粘壁的可能性越小,因此,旋流的存在对减轻粘壁有利。

对中心附近液滴而言,由于旋流分流部分热烟气,造成中心附近热容量减少,速度降低,不利于传热传质的进行,特别是距旋流入口较近的位置($H/D < 2$ 时),由于靠近喷嘴,雾化液滴受喷嘴雾化空气的刚性约束比较强,液滴相对集中于中心附近,因此,有旋流时中心附近液滴数量比无旋流时大;但由于旋流从整体上提高了塔内的气液相对滑移速度及湍动度,促进了传热传质的进行,提高了液滴的干燥速度,因此,随着雾化液滴不断的扩散蒸发,当相对高度 $H/D > 2$ 时,有旋流动下塔内各点的液滴数量明显少于无旋流时;随着高度增加,蒸发的不断进行,到相对高度 $H/D = 4$ 时,有旋流动下液滴的平均数量仅为无旋流时液滴平均数量的 37%~46%,但不论有无旋流,此时截面各点液滴有效数量都已经非常少。

2.2 气相温度的分布规律

在喷嘴操作参数不变的情况下,气相温度的变化可间接反映气液之间传质传热的情况。图7与图8分别为入口温度 155 °C、塔内平均流速 1.44 m/s、喷水量 9 L/h 时,不同工况下塔内典型截面及轴向上的气相温度分布。由图7可知,在喷嘴雾化范围内,不论有无旋流,烟气温度分布均呈中间低边壁高的趋势,有旋流时在相对高度 $H/D < 2$ 时,这种趋势更为明显;随着高度增加,中心与边壁之间温度梯度逐渐减小,到相对高度 $H/D = 5$ 时,中心温度开始大于边壁温度,此时不论有无旋流,各点温度相差不大。

分析认为,无旋流时,受边壁散热等影响,喷水前塔内气相温度的分布应该呈中间高边壁低的趋势;喷水降温后,由于喷嘴形成锥形雾化角,进入中心的烟气先与液滴接触降温,因而形成气相温度中间低边壁高的特点,随着高度增加,雾化角不断延伸,中心低温区逐渐沿径向扩散,中心与边壁间的温度梯度逐渐减小,塔内气相温度分布逐渐趋于平缓;随着高度的继续增加,到相对高度 $H/D = 5$ 时,雾化的液滴逐渐蒸发完毕,塔内温度恢复中心高边壁低的趋势。

随着旋流的加入,在脱硫塔中下部近壁处形成了明显的旋流区域,使边壁处的热容量增加,这能够延缓烟气温度的降低,但旋流风的加入,增大了液滴径向运动到壁面的速度,使壁面原始液滴浓度增加,同时旋流风也增大了切向扰动,促进了液滴的蒸发及换热的进行,这两方面能够使烟气温度加速降低,因此,壁面附近某点烟气温度是这三方面博弈的结果。但正如前文所讲,在相对高度较低($H/D < 2$)时,由于距喷嘴很近,雾化液滴受喷嘴雾化空气的刚性约束比较强,即使有旋流,其径向速度变化也不大,液滴仍相对集中于中心附近,因此,边壁附近温度的变化主要受热容量的影响。开“6旋流口”时,边壁附近旋流流量较大,热容量也较大,因此温度差别相对较大;而开“3旋流口”时旋流流量相对较小,热容量的增加对温度的影响与旋流促进液滴蒸发造成的温度下降程度相差不大,因而温度与无旋流差别不大;在中心,恰好相反,由于液滴来不及扩散,相对集中于中心周围,在烟气量相对较少的情况下,容易使烟温降的更低;因此,在相对高度较低($H/D < 2$)时,边壁与中心区域间的温度差别非常大。

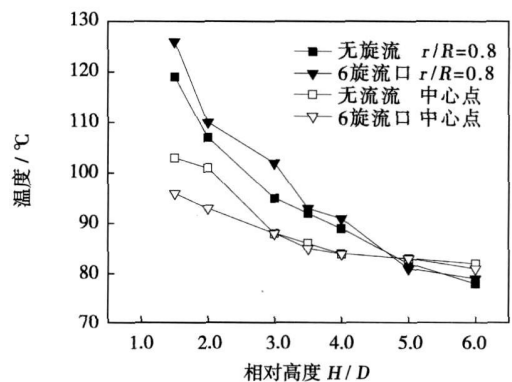


图8 不同工况下塔内轴向气相温度分布规律

随着高度的增加,旋流的影响逐渐减弱,塔内烟气温度的分布逐渐又趋于一致,烟气温度的一致化趋势引起温度分布的趋同化,因此到相对高度 $H/D = 3.5$ 时,有无旋流温度分布已基本类似;到 $H/D = 5$ 时,中心温度开始高于边壁温度,此时,可认为液滴已经完全干燥^[9];由于入口温度及总风量保持不变,喷水量也相同,因此有无旋流对液滴完全干燥后的温度及分布影响不大。另外,从图8还可看出,在旋流流量较大的情况下,直到液滴接近完全干燥前(相对高度 $H/D = 4.5$ 左右),边壁气相温度一直大于无旋流情况。通常,脱硫塔颗粒粘壁是液滴在未干燥前粘附在壁面上造成的,边壁处的高温有利于液滴

的干燥,这对减轻粘壁有利,而且根据图6中近壁处液滴的分布规律也可看出,旋流的存在能够有效降低近壁处液滴数量,因而可确定,旋流的存在有利于减轻粘壁现象。

3 结 论

(1) 应用 PDA 测试了旋/直复合流化下的液滴分布规律。在整个干燥过程中液滴在脱硫塔内的分布基本呈中心区域高边壁区域低的趋势;与常规直流通方式相比,当相对高度 $H/D > 2$ 时,旋流的存在从整体上提高了塔内各点的液滴干燥速度,而且旋流量越大,干燥速度越快;

(2) 应用双回路抽气式热电偶测试了旋/直复合流化下的气相温度分布规律。在喷嘴雾化范围内,不论有无旋流,烟气温度分布均呈中间低边壁高的趋势,有旋流时在相对高度 $H/D < 2$ 时,这种趋势更为明显;随着高度增加,中心与边壁之间温度梯度逐渐减小,到相对高度 $H/D = 5$ 时,中心温度开始大于边壁温度,有无旋流对液滴完全干燥后的温度及分布影响不大;

(3) 综合旋流对液滴分布及气相温度分布的影

响,可知旋/直复合流化方式能够有效减轻粘壁现象。

参考文献:

- [1] 郝晓文,马春元,黄盛珠,等.循环流化床脱硫塔直/旋流复合流化下的两相流场试验研究[J].热能动力工程,2005,20(5):497-500.
- [2] 郝晓文,马春元,张立强,等.内旋/直复合流化下循环流化床的脱硫[J].动力工程,2007,27(4):596-600.
- [3] 张立强.烟气循环流化床脱硫塔物料内循环特性研究[D].济南:山东大学,2008.
- [4] 王晓静,李联波.喷动流化床气相旋流流场的数值模拟及试验[J].化学工业与工程,2007,24(4):321-324,338.
- [5] 魏星,李伟力,凡凤仙,等.脱硫塔气固两相流场优化的数值模拟研究[J].中国电机工程学报,2006,26(7):12-18.
- [6] 高建民,秦裕琨,高继慧,等.循环流化床脱硫塔内流场及气固分离特性数值模拟[J].热能动力工程,2006,21(5):487-490.
- [7] LU HUILIN, DIMITRI GIDASPOW, JACQUES BOUILLARD, et al. Hydrodynamic simulation of gas-solid in a riser using kinetic theory of granular flow[J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 95(1): 1-13.
- [8] 龚泽儒. CFB-FGD 工艺烟气增湿过程温湿度场的试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [9] 高继慧,王 帅,高建民,等.提升管内熟石灰浆液雾化脱除烟气中 SO_2 过程的研究[J].中国电机工程学报,2007,27(29):40-44.

(编辑 滨)

新技术、新产品

小型水文调查船的柴油机—电力推进装置

据《Судостроение》2008年1~2月号报道,俄罗斯首制的19910型Вайач号小型水文调查船于2007年12月成功完成了交船验收的航行试验。

该船是俄罗斯造船中第一次应用单一的柴油机电力推进装置的船舶。在该船的主柴油机—电力推进装置中包括:每台功率为1000 kW的2台主柴油机发电机组;每台功率550 kW的2台推进用的异步电动机;功率为700 kVA的2台半导体变频器;2台功率为800 kVA的三相高压变压器;1个主配电盘;由芬兰Steerprop公司提供的2个全向推进器(桨舵)。

在船首部分布置有带可调螺距螺旋桨的侧向推力器。

在航行试验期间,检查了全套电力推进装置所有型的保护、联锁和限制;尤其是检查了在从螺旋桨一侧作用于主电动机的负荷急剧增加时变频器的保护动作。

该水文调查船的工厂试验、验收交船的航行试验验证了带交流电电动系统的柴油机电力推进装置高运行和技术特性。

(吉桂明 供稿)

5mm, $\phi 42 \times 5$ mm and $\phi 38 \times 5$ mm, analyzed was the influence of mass flow rate and parameters of the working medium on the wall temperature. It has been found that the mass flow rate is a dominant factor for securing a safe operation of the heating surfaces. The temperature difference between the wall surface and working medium decreases with an increase of the mass flow rate. The influence of the tubing structure and the outlet temperature of the working medium on the temperature difference between the wall surface and working medium is not evident, the influence of the tubing structure on the fin temperature, however, is relatively obvious. The pressure only affects the wall temperature to a certain extent. To consider both the safe and economic operation of a boiler at low loads, it is recommended that the design mass flow rate inside the wing wall heating surface should be chosen at a value not lower than $750 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$. The research results can well provide reference for the safe operation of wing wall heating surfaces. **Key words:** circulating fluidized bed (CFB) boiler, wing wall heating surface, metal wall temperature, mass flow rate

旋/直复合流化下循环流化床脱硫塔内的气液分布特性研究 = A Study of Gas-liquid Distribution Characteristics in a Circulating Fluidized Bed Desulfuration Tower Under a Swirling/straight Composite Fluidization Mode [刊, 汉] / CUI Lin, MA Chun-yuan, DONG Yong, SONG Zhan-long (Engineering Research Center of Environmental Thermodynamic Process under Education Ministry, College of Energy Source and Power Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 367 ~ 372

By using a laser-phase Doppler analyzer (PDA) and a dual-loop extraction-type thermocouple, tested was the liquid droplet and gas-phase temperature distribution law in a flue gas circulating fluidized-bed desulfuration tower under a swirling/straight composite fluidization mode. The measurement results show that the liquid droplet distribution in the whole drying process basically assumes a tendency of being more accumulative in the central zone and less so in the side wall zones. When compared with the conventional straight flow fluidization mode with the relative height H/D being greater than 2, the existence of a swirling flow can enhance the liquid droplet drying speed at various points in the tower on the whole. Moreover, the greater the swirling flow rate, the quicker the drying speed. In the nozzle-atomized zone, the flue-gas temperature distribution tends to assume a low value in the middle and a high one at the side walls. When the relative height H/D is lower than 2, the existence of a swirling flow can intensify the above tendency. The presence or absence of swirling flows, however, influences little on the gas phase temperature and distribution when the liquid droplets have been completely dried. From a comprehensive viewpoint, the swirling/straight composite fluidization mode can effectively ameliorate the wall-sticking phenomenon. **Key words:** circulating fluidized bed (CFB), swirling/straight composite fluidization, gas phase temperature distribution, liquid droplet distribution

船用高速齿轮齿根弯曲疲劳强度的计算 = A Calculation of the Tooth-root Bending Fatigue Strength of a Marine High-speed Gear [刊, 汉] / LI Xiu-lian (School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu Technical Normal College, Changzhou, China, Post Code: 213001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 373 ~ 377

When a ship ploughs the high seas, its hull will produce a hogging or sagging bending deformation due to the action of water buoyancy and ship weight etc., which influences the strength and service life of gears arranged in the hull longitudinal direction. In the light of defects and deficiencies of traditional marine high-speed gears caused by neglecting the inter-tooth friction, centrifugal force and hull deformation during strength calculations, with the driving gear in the involute speed-up gearing unit arranged along the hull longitudinal direction serving as an object of study, derived for the tooth-root bending fatigue was a strength calculation formula with comprehensive consideration of inter-tooth friction, centrifugal force and hull deformation. Calculation cases show that the inter-tooth friction can lead to an increase of the tooth root bending stress by 9.98% with the centrifugal stress accounting for 11.18% of the tooth-root bending permissible stress, while the hull deformation may cause an increase in the tooth-root bending stress by 7.25%. **Key words:** inter-tooth friction, centrifugal force, hull deformation, spur gear, bending fatigue strength

基于动能法测量乏气送粉煤粉浓度的研究 = A Study of the Kinetic-Energy Method-based Measurement of the Concentration of Pulverized Coal Transported by Exhaust Gas [刊, 汉] / LI Ji-ming, ZHU Hong, LU Zhen-zhong